

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 022 282 A2

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
26.07.2000 Patentblatt 2000/30

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: C07F 15/00, C07C 6/04

(21) Anmeldenummer: 00100475.3

(22) Anmeldetag: 11.01.2000

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE

Benannte Erstreckungsstaaten:

AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: 22.01.1999 DE 19902439

(71) Anmelder:

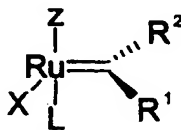
Aventis Research & Technologies GmbH & Co.  
KG  
65926 Frankfurt am Main (DE)

(72) Erfinder:

- Herrmann, Wolfgang Anton, Prof. Dr.  
85354 Freising (DE)
- Kohl, Florian J.  
80798 München (DE)
- Weskamp, Thomas  
80805 München (DE)

(54) **Homo- und heterobimetallische Alkylidenkomplexe des Rutheniums mit N-heterocyclischen Carbenliganden und deren Anwendung als hochaktive, selektive Katalysatoren für die Olefin-Metathese**

(57) Die Erfindung betrifft Komplexverbindungen des Rutheniums der allgemeinen Strukturformel I



AH

in der X ein anionischer Ligand ist,

Z einen ein- bis dreizähligen Liganden darstellt, der ein Metall enthält und nichtionisch an das Rutheniumzentrum gebunden ist,

R<sup>1</sup> und R<sup>2</sup> gleich oder unabhängig voneinander verschieden sind und für Wasserstoff oder/und eine Kohlenwasserstoffgruppe stehen, aber auch einen Cyclus ausbilden können, und

Ligand L ein N-heterocyclisches Carben ist, sowie ein Verfahren zur Herstellung von acyclischen Olefinen mit zwei oder mehr Kohlenstoffatomen oder/und von cyclischen Olefinen mit drei oder mehr Kohlenstoffatomen und die Verwendung von mindestens einer Komplexverbindung gemäß Formel I in der Olefin-Metathese.

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft homo- und heterobimetallische Alkyridenkomplexe des Rutheniums mit N-heterocyclischen Carbenliganden und ein Verfahren zur Herstellung von Olefinen durch Olefin-Metathese aus acyclischen Olefinen mit zwei oder mehr Kohlenstoffatomen oder/und aus cyclischen Olefinen mit drei oder mehr Kohlenstoffatomen, wobei mindestens eine dieser bimetalischen Alkyridenkomplexverbindungen als Katalysator eingesetzt wird.

[0002] Übergangsmetallkatalysierte C-C-Verknüpfungen gehören zu den wichtigsten Reaktionen der organischen Synthesechemie. In diesem Zusammenhang stellt die Olefin-Metathese einen wesentlichen Bestandteil dar, da mittels dieser Reaktion nebenproduktfrei Olefine synthetisiert werden können. Die Olefin-Metathese besitzt dabei nicht nur hohes Potential auf dem Sektor der präparativen, organischen Synthese wie z.B. für die Ringschlußmetathese (RCM), die Ethenolyse oder die Metathese acyclischer Olefine, sondern auch in der Polymerchemie wie z.B. für die ringöffnende Metathesepolymerisation (ROMP), die acyclische Dienmetathese (ADMET) oder Alkinpolymerisation.

[0003] Seit ihrer Entdeckung in den 50er Jahren konnten mehrere großtechnische Prozesse realisiert werden. Dennoch avancierte die Olefin-Metathese erst in jüngster Zeit durch die Entdeckung neuer Katalysatoren zu einer breit anwendbaren Synthesemethode (Übersichtsartikel siehe: J. C. Mol in: B. Cornils, W. A. Herrmann, Applied Homogeneous Catalysis with Organometallic Compounds, VCH, Weinheim, 1996, S.318-332; M. Schuster, S. Blechert, Angew. Chem. 1997, 109, 2124-2144; Zahlreiche, grundlegende Arbeiten haben wesentlich zum Verständnis dieser Übergangsmetallkatalysierten Reaktion beigetragen, bei der ein Austausch von Alkyrideneinheiten zwischen Olefinen erfolgt. Der allgemein akzeptierte Mechanismus beinhaltet Metallalkyridenkomplexe als aktive Spezies. Diese reagieren mit Olefinen zu Metallacyclobutanintermediaten, die unter Cycloreversion wieder Olefine und Alkyridenkomplexe generieren. Die Isolierung von metatheseaktiven Alkyriden- und Metallacyclobutankomplexen untermauern diese mechanistischen Vorstellungen.

[0004] Zahlreiche Beispiele finden sich vor allem in der Komplexchemie des Molybdäns und Wolframs. Speziell durch Arbeiten von Schrock wurden wohldefinierte Alkyridenkomplexe erhalten, die in ihrer Reaktivität kontrollierbar sind (J. S. Murdzek, R. R. Schrock, Organometallics 1987, 6, 1373-1374). Die Einführung einer chiralen Ligandsphäre an diesen Komplexen ermöglichte die Synthese von Polymeren mit hoher Taktizität (K. M. Totland, T. J. Boyd, G. C. Lavoie, W. M. Davis, R. R. Schrock, Macromolecules 1996, 29, 6114-6125). Chirale Komplexe gleichen Strukturtyps wurden auch in der Ringschluß-Metathese mit Erfolg eingesetzt (O. Fujimura, F. J. d. I. Mata, R. H. Grubbs, Organometallics 1996, 15, 1865-1871; J. B. Alexander, D. S. La, D. R. Cefalo, A. H. Hoveyda, R. R. Schrock, J. Am. Chem. Soc. 1998, 120, 4041-4042). Nachteilig stellt sich jedoch die hohe Empfindlichkeit gegenüber funktionellen Gruppen, Luft und Wasser heraus.

[0005] In jüngster Zeit haben sich phosphorhaltige Komplexsysteme des Rutheniums etabliert (R. H. Grubbs, S. T. Nguyen, L. K. Johnson, M. A. Hillmyer, G. C. Fu, WO 96/04289, 1994; P. Schwab, M. B. France, J. W. Ziller, R. H. Grubbs, Angew. Chem., 1995, 107, 2179-2181; Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 1995, 34, 2039-2041; R. H. Grubbs, E. L. Dias, Organometallics, 1998, 17, 2758). Aufgrund des elektronenreichen, "weichen" Charakters später Übergangsmetalle besitzen diese Komplexe eine hohe Toleranz gegenüber harten, funktionellen Gruppen. Dies wird beispielsweise durch ihren Einsatz in der Naturstoffchemie (RCM von Dienen) demonstriert (Z. Yang, Y. He, D. Vourloumis, H. Vallberg, K. C. Nicolaou, Angew. Chem. 1997, 109, 170-172; Angew. Chem., Int. Ed. Engl. 1997, 36, 166-168; D. Meng, P. Bertinato, A. Balog, D. S. Su, T. Kamenecka, E. J. Sorensen, S. J. Danishefsky, J. Am. Chem. Soc. 1997, 119, 2733-2734; D. Schinzer, A. Limberg, A. Bauer, O. M. Böhm, M. Cordes, Angew. Chem. 1997, 109, 543-544; Angew. Chem., Int. Ed. Engl. 1997, 36, 523-524; A. Fürstner, K. Langemann, J. Am. Chem. Soc. 1997, 119, 9130-9136).

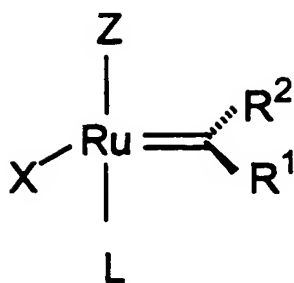
[0006] Die Variationsbreite der verwendeten Phosphorliganden ist jedoch aufgrund sterischer und elektronischer Faktoren sehr limitiert. Lediglich stark basische, sterisch anspruchsvolle Alkylphosphane wie Tricyclohexyl-, Triisopropyl- und Tricyclopentylphosphor eignen sich für die Metathese acyclischer Olefine und wenig gespannter Ringsysteme. Demnach sind diese Katalysatoren nicht in ihrer Reaktivität einstellbar. Auch chirale Komplexe dieses Strukturtyps konnten nicht realisiert werden.

[0007] Es konnte von den Erfindern der vorliegenden Erfindung bereits gezeigt werden, daß durch die Einführung von N-heterocyclischen Carbenen als Liganden nicht nur die Aktivität dieser Systeme gesteigert werden kann, sondern auf Grund der wesentlich variableren Ligandsphäre auch neuartige Steuermöglichkeiten wie z.B. in bezug auf Chiralität, Taktizität oder Regulierung der Aktivität zugänglich werden (T. Weskamp, W. C. Schattenmann, M. Spiegler, W. A. Herrmann, Angew. Chem. 1998, 110, 2631-2633; Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 1998, 37, 2490-2493).

[0008] Die Toleranz gegenüber funktionellen Gruppen wird aber in allen Rutheniumsystemen nach wie vor mit einer im Vergleich zu Molybdän und Wolfram deutlich verminderten Aktivität bezahlt.

[0009] Aus diesen Gründen bestand die Aufgabe, maßgeschneiderte Metathesekatalysatoren zu entwickeln, die sich neben ihrer hohen Toleranz gegenüber funktionellen Gruppen und einer variableren Ligandsphäre durch deutlich gesteigerte Aktivitäten auszeichnen.

[0010] Die Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch eine Komplexverbindung des Rutheniums der allgemeinen Strukturformel I,



in der X ein anionischer Ligand ist,

in der Z einen ein- bis dreizähligen Liganden darstellt, der ein Metall enthält und nicht-ionisch an das Rutheniumzentrum gebunden ist,

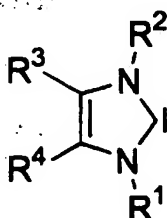
in der R<sup>1</sup> und R<sup>2</sup> gleich oder unabhängig voneinander verschieden sind, aber auch einen Cyclus ausbilden können,

in der R<sup>1</sup> und R<sup>2</sup> für Wasserstoff oder/und für eine Kohlenwasserstoffgruppe stehen,

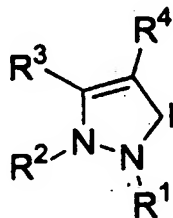
wobei die Kohlenwasserstoffgruppen gleich oder unabhängig voneinander verschieden aus einem geradkettigen oder verzweigten oder/und cyclischen Rest aus der Gruppe von Alkylresten mit 1 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkenylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkynylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Arylresten mit 6 bis 30 Kohlenstoffatomen und Silylresten bestehen,

wobei in den Kohlenwasserstoff- oder/und Silylgruppen die Wasserstoffatome teilweise oder gänzlich durch eine Alkyl-, Aryl-, Alkenyl-, Alkynyl-, Metallocenyl-, Halogen-, Nitro-, Nitroso-, Hydroxy-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amino-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio- oder/und Sulfonylgruppe einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden ersetzt sein können,

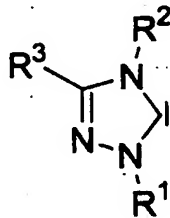
in der Ligand L ein N-heterocyclisches Carben der allgemeinen Formeln II - V ist,



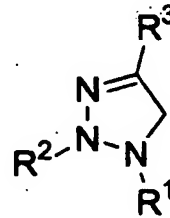
II



III



IV



V

wobei R<sup>1</sup>, R<sup>2</sup>, R<sup>3</sup> und R<sup>4</sup> in den Formeln II, III, IV und V gleich oder unabhängig voneinander verschieden für Wasserstoff oder/und für eine Kohlenwasserstoffgruppe stehen,

wobei die Kohlenwasserstoffgruppen gleich oder unabhängig verschieden voneinander aus cyclischen, geradkettigen oder/und verzweigten Resten aus der Gruppe von Alkylresten mit 1 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkenylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkynylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Arylresten mit 6 bis 30 Kohlenstoffatomen bestehen, bei denen gegebenenfalls mindestens ein Wasserstoff durch funktionelle Gruppen ersetzt sein kann, und wobei gegebenenfalls R<sup>3</sup> und R<sup>4</sup> für Halogen-, Nitro-, Nitroso-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio-, Silyl- oder/und Sulfonylgruppe einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden stehen kann.

**[0011]** Die erfindungsgemäß aufgebauten Alkylidenkomplexverbindungen mit einem N-heterocyclischen Carbenliganden in Kombination mit einem ein- bis dreizähligen Liganden Z sind hochaktive Katalysatoren für die Olefin-Metathese. Sie sind besonders kostengünstig. Die Olefin-Metathese mit den erfindungsgemäßen Katalysatoren zeichnet sich neben einer hohen Toleranz gegenüber unterschiedlichsten funktionellen Gruppen und ihrer Variationsvielfalt in der Ligandensphäre insbesondere durch eine große Aktivität aus.

**[0012]** Durch Variation des präparativ einfach zugänglichen N-heterocyclischen Carbenliganden L können Aktivität und Selektivität gezielt gesteuert, und darüber hinaus kann Chiralität auf einfache Art und Weise eingeführt werden.

**[0013]** So können in den allgemeinen Formeln II, III, IV und V der Wasserstoff in den Kohlenwasserstoffgruppen R<sup>1</sup>, R<sup>2</sup>, R<sup>3</sup> und R<sup>4</sup> teilweise oder gänzlich durch Halogen-, insbesondere Chlor, Brom oder Jod, Nitro-, Nitroso-,

Hydroxy-, Aryloxy-, Amino-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio-, Sulfonyl-, oder/und Metallocenylgruppen einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden ersetzt sein.

[0014] Beispiele für funktionelle Gruppen als geeignete substituierte Gruppen  $R^1$ ,  $R^2$ ,  $R^3$  und  $R^4$  können sein Hydroxymethyl, 2-Hydroxyethyl, 3-Hydroxypropyl, Aminomethyl, 2-Aminoethyl, 3-Aminopropyl, 2-Acetyethylaminoethyl, Ethoxyethyl, Polyether, Ethoxyacetyl, Methoxycarbonylethyl, Ethoxycarbonylethyl, Kaliumcarboxylatomethyl und Isopropylaminocarbonylmethyl.

[0015]  $R^1$  und  $R^2$  können beispielsweise ausgewählt werden unter Resten Methyl, Ethyl, Isopropyl, Cyclopropyl, Cyclohexyl, 1-Phenylethyl, 1-Naphthylethyl, 1-tert.-Butylethyl, tert. Butyl, Phenyl, gegebenenfalls substituiert mit Nitro-, Amino-, Hydroxy- oder/und Carboxylgruppen, Mesityl, Toly und Naphthyl. Soweit Chiralität gegeben ist, können die

Reste auch in (R) und (S)-Form vorliegen.

[0016] Als Beispiele für  $R^3$  und  $R^4$  können Wasserstoff, Methyl, Ethyl und Phenyl, gegebenenfalls substituiert mit einer Nitro-, Amino- Hydroxy oder/und Carboxylgruppe genannt werden. In diesen Formeln können  $R^3$  und  $R^4$  auch ein anneliertes Ringsystem bilden.

[0017] Die Liganden L der allgemeinen Formeln II, III, IV oder/und V können zentrale, axiale oder/und planare Chiralität aufweisen.

[0018] In der allgemeinen Formel I steht Z für einen ein- bis dreizählige Liganden  $L_nMX_m$  wobei  $n = 0$  bis 4,  $m = 0$  bis 6 und  $m + n \neq 0$  ist, L' gleich oder unabhängig verschieden voneinander ausgewählt sein kann unter  $\pi$ -gebundenen, ungesättigten carbocyclischen Kohlenwasserstoffen und neutralen Elektronendonoren, X' gleich oder unabhängig verschieden voneinander für einen anionischen Liganden aus der Gruppe von Halogenid, Pseudohalogenid, Tetraphenylborat, perhalogeniertes Tetraphenylborat, Tetrahalogenoborat, Hexahalogenophosphat, Hexahalogenoantimonat, Trihalogenmethansulfonat, Alkoxid, Thiolat, Carboxylat, Tetrahalogenoaluminat, Tetracarbonylcobaltat, Hexahalogenoferrat(III), Tetrahalogenoferrat(III) oder/und Tetrahalogenopalladat(II) stehen kann und M für ein Metall steht.

[0019] Bevorzugte Beispiele für L' sind Cyclopentadienyl-, Pentamethylcyclopentadienyloder anders substituierte Cyclopentadienylreste, Benzol und substituierte Benzole, beispielsweise Cymol, sowie Phosphane, Phosphite, Amine, Imine, Nitrile, N-heterocyclische Carbene und Carbonyl.

[0020] Bevorzugte Beispiele für X' sind Halogenid, insbesondere Chlor, Brom oder Jod, Pseudohalogenid, Alkoxid, Thiolat, Amid- und Carboxylat.

Stellt das Halonid einen Substituenten in einer der vorstehend genannten Verbindungen dar, ist Chlorid bevorzugt.

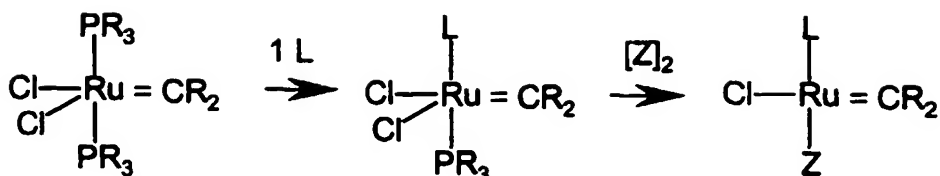
[0021] Das Metall M kann ausgewählt sein unter einem Metall der 1. bis 8. Nebengruppe und einem Metall der 1. bis 4. Hauptgruppe, insbesondere einem Metall der 1., 2., 6., 7. und 8. Nebengruppe sowie der 1. bis 4. Hauptgruppe, wobei Metalle der 8. Nebengruppe besonders bevorzugt sind. Bevorzugte Beispiele sind Os, Ru, Ir, Rh, Fe und Pd für die 8. Nebengruppe, Re für die 7. Nebengruppe, Mo und W für die 6. Nebengruppe und B, Al und Si für die 3. und 4. Hauptgruppe.

[0022] Der anionische Ligand X der erfindungsgemäßen Komplexverbindung ist vorzugsweise ein Halogenid, Pseudohalogenid, Tetraphenylborat, perhalogeniertes Tetraphenylborat, Tetrahalogenoborat, Hexahalogenophosphat, Hexahalogenoantimonat, Trihalogenomethansulfonat, Alkoxid, Phenolat, Thiolat, Carboxylat, Tetrahalogenoaluminat, Tetracarbonyl-Cobaltat, Hexahalogenoferrat(III), Tetrahalogenoferrat(III) oder/und Tetrahalogenopalladat(II), wobei Halogenid, Pseudohalogenid, Tetraphenylborat, perfluoriertes Tetraphenylborat, Tetrafluaroborat, Hexafluorophosphat, Hexafluoroantimonat, Trifluormethansulfonat, Alkoxid, Phenolat, Carboxylat, Tetrachloroaluminat, Tetracarbonyl-Cobaltat, Hexafluoroferrat(III) Tetrachloroferrat(III) oder/und Tetrachloropalladat(II) bevorzugt sind und wobei unter den Pseudohalogeniden Cyanid, Rhodanid, Cyanat, Isocyanat, Thiocyanat und Isothiocyanat bevorzugt sind, wobei als Halogenid vorzugsweise Chlor, Brom oder auch Jod eingesetzt werden.

[0023] Vorzugsweise weisen die Alkylreste, Alkenylreste, Alkinyreste bzw. die Alkylreste, Alkenylreste, Alkinylenreste in den Formeln I bis VI 1 bzw. 2 bis 20 Kohlenstoffatome, besonders bevorzugt 1 bzw. 2 bis 12 Kohlenstoffatome, auf.

[0024] In der allgemeinen Strukturformel I der Komplexverbindung stehen  $R^1$  bis  $R^2$  bevorzugt für Wasserstoff, substituierte oder/und nichtsubstituierte Alkyl-, Alkenyl- oder/und Arylreste, X bevorzugt für Halogenid-, Alkoxid- oder/und Carboxylationen sind und L bevorzugt für ein N-heterocyclisches Carben der allgemeinen Formel II.

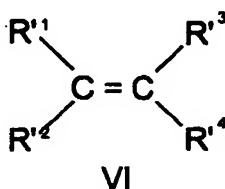
[0025] Die Synthese der Komplexe erfolgt üblicherweise durch Ligandensubstitution entsprechender Phosphankomplexe. Diese können entsprechend der Reaktionsgleichung in einem ersten Schritt selektiv einfach aber auch zweifach substituiert werden und anschließend in einem zweiten Schritt beispielsweise mit dem entsprechendem Dimeren von Z zur erfindungsgemäßen Komplexverbindung reagieren:



[0026] Die erfindungsgemäßen Komplexverbindungen erweisen sich als äußerst effiziente Katalysatoren in der Olefin-Metathese. Die ausgezeichnete Metatheseaktivität wird durch mehrere Beispiele verschiedener metathetischer Reaktionen in den Beispielen demonstriert.

[0027] Deshalb umfaßt diese Erfindung auch die Verfahren aller Olefin-Metathese-Reaktionen wie Ringöffnende Metathesepolymerisation (ROMP), Metathese acyclischer Olefine, Ethanolyse, Ringschlußmetathese (RCM), acyclische Dienmetathese-Polymerisation (ADMET) und Depolymerisation olefinischer Polymere. Die hohe Stabilität und Toleranz der erfindungsgemäßen Komplexverbindungen gegenüber funktionellen Gruppen, insbesondere Gruppen von Alkoholen, Aminen, Thiolen, Ketonen, Aldehyden, Carbonsäuren, Estern, Amiden, Ethern, Silanen, Sulfiden und Halogenen erlaubt die Anwesenheit derartiger funktioneller Gruppen während der Metathesereaktion.

[0028] Die Aufgabe wird ferner durch ein Verfahren zur Herstellung von acyclischen Olefinen mit zwei oder mehr Kohlenstoffatomen oder/und von cyclischen Olefinen mit drei oder mehr Kohlenstoffatomen jeweils entsprechend der allgemeinen Formel VI



aus acyclischen Olefinen mit zwei oder mehr Kohlenstoffatomen oder/und aus cyclischen Olefinen mit drei oder mehr Kohlenstoffatomen jeweils entsprechend der allgemeinen Formel VII durch Olefin-Metathese-Reaktion in Gegenwart mindestens einer der vorstehend beschriebenen Komplexverbindungen gelöst, wobei  $\text{R}'^1$ ,  $\text{R}'^2$ ,  $\text{R}'^3$  und  $\text{R}'^4$  in der allgemeinen Formel VI für Wasserstoff oder/und Kohlenwasserstoffgruppen stehen,

wobei die Kohlenwasserstoffgruppe aus gleich oder unabhängig voneinander verschieden geradkettigen, verzweigten oder/und cyclischen Resten aus der Gruppe von Alkylresten mit 1 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkenylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkynylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Arylresten mit 6 bis 30 Kohlenstoffatomen, Metallo-cenyl- oder/und Silylresten besteht, bei denen gegebenenfalls mindestens ein Wasserstoff durch eine funktionelle Gruppe ersetzt sein kann,

wobei gegebenenfalls  $\text{R}'^1$ ,  $\text{R}'^2$ ,  $\text{R}'^3$  und  $\text{R}'^4$  für Halogen-, Nitro-, Nitroso-, Hydroxy-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amino-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio-, Sulfonyl- oder/und Metallocenylgruppen einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden stehen können.

[0029] Vorzugsweise sind in den eingesetzten oder/und in den herzustellenden Olefinen eine oder/und mehrere Doppelbindungen enthalten. Insbesondere können  $\text{R}'^1$ ,  $\text{R}'^2$ ,  $\text{R}'^3$  und  $\text{R}'^4$  in den Olefinen der allgemeinen Formel VI paarweise einen Cyclus ausbilden.

[0030] In den Olefinen der allgemeinen Formel VI kann der Wasserstoff in den Kohlenwasserstoffgruppen  $\text{R}'^1$ ,  $\text{R}'^2$ ,  $\text{R}'^3$  und  $\text{R}'^4$  teilweise oder gänzlich durch Halogen-Silyl-, Nitro-, Nitroso-, Hydroxy-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amino-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio-, Sulfonyl- oder/und Metallocenylgruppen einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden ersetzt.

[0031] Für  $\text{R}'^1$ ,  $\text{R}'^2$ ,  $\text{R}'^3$  und  $\text{R}'^4$  sowie für Substituenten des Wasserstoffs können die gleichen Beispiele genannt werden wie in bezug auf die Formeln I bis V vorstehend aufgeführt.

[0032] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren kann der Prozeß mit oder ohne Lösungsmittel, jedoch vorzugsweise mit organischen Lösungsmitteln, durchgeführt werden. Das erfindungsgemäße Verfahren kann unter Zusatz einer Brönstedt-Säure, vorzugsweise von HCl, HBr, HI,  $\text{HBF}_4$ ,  $\text{HPF}_6$ , oder/und Trifluoressigsäure, oder/und unter Zusatz einer Lewis-Säure, vorzugsweise von  $\text{BF}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$  oder/und  $\text{ZnI}_2$ , durchgeführt werden.

Damit wird es erstmals überraschenderweise möglich, mit großer Katalysatoraktivität die verschiedensten Olefine indi-

viduell auf unterschiedliche Eigenschaften aufgrund einfacher Variation der Katalysebedingungen oder/und der Katalysatoren maßgeschneidert zu erhalten, nicht zuletzt da das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung von Olefinen eine unerwartet hohe Toleranz gegenüber funktionellen Gruppen aufweist.

## 5 Beispiele

[0033] Die folgenden Beispiele belegen die Erfindung, schränken sie aber nicht in ihrer Breite ein.

### 1) Herstellung der erfindungsgemäßen Komplexverbindung

Allgemeine Arbeitsvorschrift:

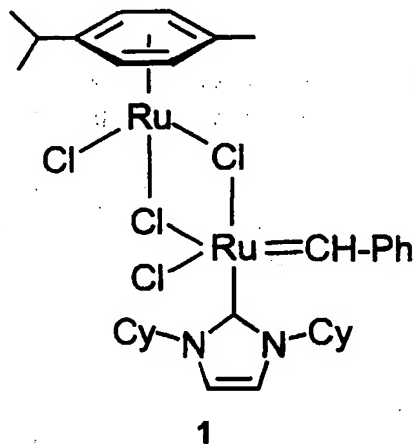
[0034] 1 mmol  $\text{RuCl}_2(\text{di-R-imidazolin-2-yliden})_2(\text{CHPh})$  oder  $\text{RuCl}_2(\text{di-R-imidazolin-2-yliden})(\text{PCy}_3)(\text{CHPh})$  worin R für einen beliebigen Rest steht, werden in 5 ml  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  gelöst und mit einer Lösung von 1 mmol  $[\text{LMX}'_2]_2$  in 5 ml  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  versetzt. Die Reaktionslösung wird etwa 15 bis 180 min bei Raumtemperatur RT gerührt, anschließend wird das Lösungsmittel entfernt, der Komplex mit einem Toluol/Pentan-Gemisch gewaschen und mehrere Stunden im Hochvakuum getrocknet.

Die Umsetzungen verlaufen in den angegebenen Zeiträumen quantitativ.

[0035] Nach der angegebenen allgemeinen Arbeitsvorschrift wurden folgende Verbindungen hergestellt:

Katalysator 1)

[0036]



Edukte:  $\text{RuCl}_2(\text{di-cyclohexyl-imidazolin-2-yliden})(\text{PCy}_3)(\text{CHPh})$  und  $[(\text{p-Cymol})\text{RuCl}_2]_2$

Reaktionszeit: 2 h

Elementaranalyse für $\text{C}_{32}\text{H}_{44}\text{Cl}_4\text{N}_2\text{Ru}_2$ :	berechnet	C 48.00,	H 5.54,	N 3.50
	gefunden	C 48.11;	H 5.61;	N 3.52.

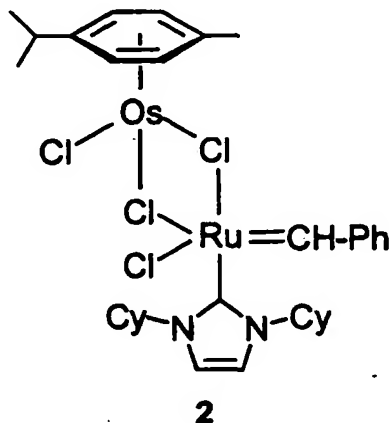
$^1\text{H}$  NMR ( $\text{CD}_2\text{Cl}_2$  /25°C):  $\delta$  = 21.14 (1H, s,  $\text{Ru}=\text{CH}$ ), 7.89 (2H, d,  $^3J_{\text{HH}}$  = 7.8 Hz, *o*-H von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 7.67 (1H, t,  $^3J_{\text{HH}}$  = 7.8 Hz, *p*-H von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 7.22 (2H, t,  $^3J_{\text{HH}}$  = 7.8 Hz, *m*-H von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 7.09 (1H, s, NCH), 6.65 (1H, s, NCH), 5.70 (1H, m, CH von  $\text{NC}_6\text{H}_{11}$ ), 5.53, 5.50, 5.43, und 5.28 (alle 1H, d,  $^3J_{\text{HH}}$  = 5.7 Hz, CH von *p*-Cymol), 3.05 (1H, m, CH von  $\text{NC}_6\text{H}_{11}$ ), 2.85 (1H, m,  $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$  von *p*-Cymol), 2.34 (3H, s,  $\text{CH}_3$  von *p*-Cymol), 1.82-0.91 (20H, alle m,  $\text{CH}_2$  von  $\text{NC}_6\text{H}_{11}$ ), 1.41 (3H, d,  $^3J_{\text{HH}}$  = 7.0 Hz,  $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$  von *p*-Cymol), 1.27 (3H, d,  $^3J_{\text{HH}}$  = 7.0 Hz,  $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$  von *p*-Cymol).  $^{13}\text{C}$  NMR ( $\text{CD}_2\text{Cl}_2$  /25 °C):  $\delta$  = 319.4 ( $\text{Ru}=\text{CH}$ ), 165.2 (NCN), 154.0 (*ipso*-C von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 131.4, 130.7, und



128.7 (*o*-C, *m*-C, und *p*-C von C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>), 119.1 und 118.0 (NCH), 101.3, 96.8, 81.3, 80.6, 79.7, und 79.4 (*p*-Cymol), 58.9 und 56.7 (CH von NC<sub>6</sub>H<sub>11</sub>), 36.0, 34.9, 31.3, 25.8, 25.4, und 22.3 (CH<sub>2</sub> von NC<sub>6</sub>H<sub>11</sub>), 30.8 (CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> von *p*-Cymol), 22.2 und 21.9 (CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> von *p*-Cymol), 18.8 (CH<sub>3</sub> von *p*-Cymol).

5 Katalysator 2)

[0037]



Edukte: RuCl<sub>2</sub>(di-cyclohexyl-imidazolin-2-yliden)<sub>2</sub>(CHPh) und [(*p*-Cymol)OsCl<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

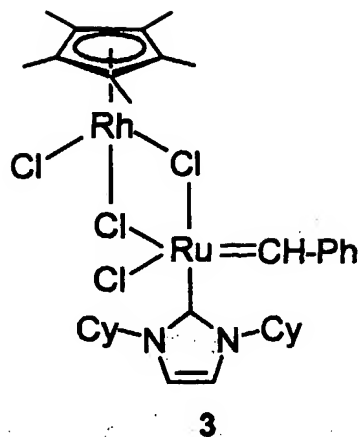
Reaktionszeit: 3 h

Elementaranalyse für C <sub>32</sub> H <sub>44</sub> Cl <sub>4</sub> N <sub>2</sub> OsRu:	berechnet	C 43.14,	H 4.98,	N 3.15
	gefunden	C 43.31;	H 5.11;	N 3.13.

<sup>1</sup>H NMR (CD<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/ 25 °C): δ = 21.21 (1H, s, Ru=CH), 7.91 (2H, d, <sup>3</sup>J<sub>HH</sub> = 6.4 Hz, *o*-H von C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>), 7.72 (1H, t, <sup>3</sup>J<sub>HH</sub> = 6.4 Hz, *p*-H von C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>), 7.24 (2H, t, <sup>3</sup>J<sub>HH</sub> = 6.4 Hz, *m*-H von C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>), 7.04 (1H, s, NCH), 6.69 (1H, s, NCH), 5.70 (1H, m, CH von NC<sub>6</sub>H<sub>11</sub>), 6.08 (1H, d, <sup>3</sup>J<sub>HH</sub> = 5.9 Hz, CH von *p*-Cymol), 5.95 (1H, d, <sup>3</sup>J<sub>HH</sub> = 5.9 Hz, CH von *p*-Cymol), 5.75 (2H, app t, <sup>3</sup>J<sub>HH</sub> = 5.9 Hz, CH von *p*-Cymol), 3.07 (1H, m, CH von NC<sub>6</sub>H<sub>11</sub>), 2.83 (1H, m, CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> von *p*-Cymol), 2.34 (3H, s, CH<sub>3</sub> von *p*-Cymol), 1.90-0.85 (20H, alle m, CH<sub>2</sub> von NC<sub>6</sub>H<sub>11</sub>), 1.39 (3H, d, <sup>3</sup>J<sub>HH</sub> = 6.8 Hz, CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> von *p*-Cymol), 1.33 (3H, d, <sup>3</sup>J<sub>HH</sub> = 6.8 Hz, CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> von *p*-Cymol). <sup>13</sup>C NMR (CD<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/25 °C): δ = 319.7 (Ru=CH), 165.0 (NCN), 153.9 (*ipso*-C von C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>), 131.2, 130.7, und 128.6 (*o*-C, *m*-C, und *p*-C von C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>), 119.3 und 118.1 (NCH), 96.5, 91.5, 71.6, 71.4, 70.4, und 69.7 (*p*-Cymol), 58.8 und 56.5 (CH von NC<sub>6</sub>H<sub>11</sub>), 35.8, 35.3, 31.2, 25.9, 25.2, und 22.7 (CH<sub>2</sub> von NC<sub>6</sub>H<sub>11</sub>), 31.2 (CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> von *p*-Cymol), 22.2 und 22.1 (CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> von *p*-Cymol), 18.7 (CH<sub>3</sub> von *p*-Cymol).

Katalysator 3)

[0038]



Edukte:  $\text{RuCl}_2(\text{di-cyclohexyl-imidazolin-2-yliden})_2(\text{CHPh})$  und  $[(\text{Cp}^*\text{RhCl}_2)_2]$   
 Reaktionszeit: 15 min

Elementaranalyse für $\text{C}_{45}\text{H}_{46}\text{Cl}_2\text{N}_4\text{RhRu}$ :	berechnet	C 47.88,	H 5.65,	N 3.49
	gefunden	C 47.99,	H 5.70,	N 3.45.

$^1\text{H-NMR}$  ( $\text{CD}_2\text{Cl}_2/25^\circ\text{C}$ ):  $\delta = 21.20$  (1H, s,  $\text{Ru}=\text{CH}$ ), 7.95 (2H, d,  $^3J_{\text{HH}} = 7.2$  Hz, *o*-H von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 7.67 (1H, t  $^3J_{\text{HH}} = 7.2$  Hz, *p*-H von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 7.25 (2H, t,  $^3J_{\text{HH}} = 7.8$  Hz, *m*-H von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 7.09 (1H, s, NCH), 6.68 (1H, s, NCH), 6.57 (1H, m, CH von  $\text{NC}_6\text{H}_{11}$ ), 2.97 (1H, m, CH von  $\text{NC}_6\text{H}_{11}$ ), 1.85-0.86 (20H, alle m,  $\text{CH}_2$  von  $\text{NC}_6\text{H}_{11}$ ), 1.74 (15H, s,  $\text{CH}_3$  von  $\text{Cp}^*$ ).  $^{13}\text{C-NMR}$  ( $\text{CD}_2\text{Cl}_2/25^\circ\text{C}$ ):  $\delta = 319.3$  ( $\text{Ru}=\text{CH}$ ), 164.4 (NCN), 153.5 (*ipso*-C von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 131.2, 130.4, und 128.7 (*o*-C, *m*-C, und *p*-C von  $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 118.9 und 118.3 (NCH), 94.3 (d,  $J_{\text{RhC}} = 7.5$  Hz,  $\text{CCH}_3$  von  $\text{Cp}^*$ ), 58.3 und 56.4 (CH von  $\text{NC}_6\text{H}_{11}$ ), 35.2, 34.1, 33.3, 25.8, 22.4, 21.2 ( $\text{CH}_2$  von  $\text{NC}_6\text{H}_{11}$ ), 9.31 ( $\text{CH}_3$  von  $\text{Cp}^*$ ).

## 2 - 4) Anwendung der erfindungsgemäßen Komplexverbindung bei der OlefinMetathese

[0039] Die im folgenden aufgeführten Beispiele demonstrieren das Potential der erfindungsgemäßen Komplexverbindungen in der Olefinmetathese. Der Vorteil dieser erfindungsgemäßen Komplexverbindungen verglichen mit bekannten phosphorhaltigen Systemen liegt in der deutlich gesteigerten Aktivität insbesondere in der Ringöffnenden Metathesepolymerisation. Dadurch können Olefine effektiv metathetisiert werden, die sonst nicht oder nur schwer einer Metathesereaktion unterzogen werden können.

### 2) Ringöffnende Metathesepolymerisation

[0040] Als Beispiele dienen Norbornen, funktionalisiertes Norbornen, 1,5-Cyclooctadien und Cyclopenten

#### 2a) Ringöffnende Metathesepolymerisation von Norbornen

[0041] Zur Demonstration der Aktivität wurde Norbornen einer Ringöffnenden Metathesepolymerisation unterzogen.

## Typischer Reaktionsansatz:

[0042] In einem Kolben werden 1.0  $\mu\text{mol}$  der jeweiligen Komplexverbindung in 30 ml  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  gelöst. Die Reaktion wird durch Zugabe von 20.0 mmol Norbornen gestartet und nach gewisser Zeit durch Eingießen der Reaktionslösung in 500 ml Methanol (Ausfällen des gebildeten Polynorbornenamers) gestoppt. Das ausgefällte Polynorbornenamer wird durch Filtration isoliert und nach mehrmaligem Umfällen aus  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  / Methanol oder Toluol / Methanol im Hochvakuum bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Ausbeutebestimmung erfolgt gravimetrisch.

[0043] Die Katalysatoren, Reaktionszeiten, Ausbeuten und Turnover Frequencies (TOF) sind in Tab. 1 angegeben.

Katalysator	Monomer / Katalysator	Zeit [s]	Ausbeute [%]	TOF [ $\text{h}^{-1}$ ]
1	20000	60	76	$9 \cdot 10^5$
2	20000	60	82	$1 \cdot 10^6$
3	20000	20	80	$3 \cdot 10^6$

Tab. 1 ROMP von Norbornen mit erfindungsgemäßen Komplexverbindungen.

## 2b) Ringöffnende Metathesepolymerisation von funktionalisierten Norbornenderivaten

[0044] Zur Demonstration der Aktivität und der Toleranz gegenüber funktionellen Gruppen wurde Essigsäure-5-norbornen 2-yl-ester einer Ringöffnenden Metathesepolymerisation unterzogen.

## Typischer Reaktionsansatz:

[0045] In einem Kolben werden 1.0  $\mu\text{mol}$  der jeweiligen Komplexverbindung in 2 ml  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  gelöst. Die Reaktion wird durch Zugabe von 5.0 mmol Essigsäure-5-norbornen 2-yl-ester gestartet und nach gewisser Zeit durch Eingießen der Reaktionslösung in 500 ml Methanol (Ausfällen des gebildeten Polynorbornenamers) gestoppt. Das ausgefällte Polynorbornenamer wird durch Filtration isoliert und nach mehrmaligem Umfällen aus  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  / Methanol oder Toluol / Methanol im Hochvakuum bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Ausbeutebestimmung erfolgt gravimetrisch.

[0046] Die Katalysatoren, Reaktionszeiten, Ausbeuten und TOFs sind in Tab. 2 angegeben.

Katalysator	Monomer / Katalysator	Zeit [s]	Ausbeute [%]	TOF [h <sup>-1</sup> ]
-------------	--------------------------	----------	--------------	------------------------

1	5000	180	95	$1 \cdot 10^5$
---	------	-----	----	----------------

2	5000	180	95	$1 \cdot 10^5$
---	------	-----	----	----------------

3	5000	60	80	$2 \cdot 10^5$
---	------	----	----	----------------

**Tab. 2 ROMP von Essigsäure-5-norbornen-2-yl-ester mit erfindungsgemäßen Komplexverbindungen.**

### 2c) Ringöffnende Metathesepolymerisation von 1,5-Cyclooctadien

**[0047]** Zur Demonstration der Aktivität der erfindungsgemäßen Komplexverbindungen wurden NMR-spektroskopisch kontrollierte Kinetiken der Ringöffnenden Metathesepolymerisation von 1,5-Cyclooctadien aufgenommen. Aufgrund seiner gegenüber Norbornen deutlich verringerten Ringspannung gilt 1,5-Cyclooctadien bereits als äußerst schwierig zu polymerisierendes Substrat.

#### Typischer Reaktionsansatz:

**[0048]** In einem NMR-Rohr werden 1.8 µmol der jeweiligen erfindungsgemäßen Komplexverbindung vorgelegt und in 0.55 ml CD<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> gelöst (alternativ wird eine eingestellte Maßlösung verwendet). Anschließend wird die Polymerisationsreaktion durch Zugabe von 55 µl 1,5-Cyclooctadien (Monomer: Katalysator = 250 : 1) gestartet. Durch Aufnahme von <sup>1</sup>H-NMR-Spektren wird der Fortgang der Reaktion verfolgt.

Durch Integration der zeitabhängigen Signale von Produkt (Polycyclooctadienamer) und Edukt (Cyclooctadien) ergeben sich die zeitabhängigen Ausbeuten an Polycyclooctadienamer gemäß Abbildung 1 und die Turnover Frequencies (TOF), wie sie in Tab. 3 angegeben sind.

Komplex	Zeit [min]	Ausbeute [%]	TOF [h <sup>-1</sup> ]
---------	------------	--------------	------------------------

1	10.9	80	1100
---	------	----	------

2	9.1	80	1300
---	-----	----	------

3	1.2	80	10000
---	-----	----	-------

**Tab. 3 ROMP von 1,5-Cyclooctadien mit verschiedenen erfindungsgemäßen Komplexverbindungen unter NMR-Bedingungen.**

**[0049]** Die hierbei erzielten TOFs liegen deutlich über denen bekannter Systeme. So weisen analoge Phosphansysteme, die gleichzeitig die aktivsten literaturbekannten Systeme auf Rutheniumbasis darstellen, unter gleichen Bedin-

gungen TOFs von 200 bis maximal 1000 h<sup>-1</sup> auf.

## 2d) Ringöffnende Metathesepolymerisation von Cyclopenten

- 5 [0050] Ähnlich wie 1,5-Cyclooctadien gilt Cyclopenten als äußerst schwierig zu polymerisierendes Substrat.

Typischer Versuchsansatz:

- 10 [0051] In einem Kolben werden 1.0 µmol der jeweiligen Komplexverbindung in 1 ml CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> gelöst. Die Reaktion wird durch Zugabe von 5.0 mmol Cyclopenten gestartet und nach gewisser Zeit durch Eingießen der Reaktionslösung in 500 ml Methanol (Ausfällen des gebildeten Polycyclopentenamers) gestoppt. Das ausgefällte Polycyclopentenamer wird durch Filtration isoliert und nach mehrmaligem Umfällen aus CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> / Methanol oder Toluol / Methanol im Hochvakuum bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Ausbeutebestimmung erfolgt gravimetrisch. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 zusammengefasst.

15

20

25

30

Katalysator	Monomer / Katalysator	Zeit [min]	Ausbeute [%]	TOF [h <sup>-1</sup> ]
1	5000	30	25	2500
2	5000	30	28	2800
3	5000	5	10	6000

Tab. 4. ROMP von Cyclopenten mit verschiedenen erfindungsgemäßen Komplexverbindungen.

35

## 3) Ringschlußmetathese

- 40 [0052] Das Potential der erfindungsgemäßen Komplexverbindungen in der Ringschlußmetathese wird durch die Reaktion von 1,7-Octadien zu Cyclohexen unter Freisetzung von Ethylen veranschaulicht (Tab. 5)

Typischer Reaktionsansatz:

- 45 [0053] Eine Lösung von 6.3 µmol der jeweiligen Komplexverbindung in 2 ml 1,2-Dichlorethan wurde mit 0.45 mmol 1,7-Octadien versetzt. Nach 10 min bei 60 °C wurde das Reaktionsgemisch GC/MS-analytisch untersucht.

50

55

Katalysator	Monomer / Katalysator	Zeit [min]	Ausbeute [%]
1	50	10	> 98
2	50	10	> 98
3	50	10	> 98

Tab. 5 RCM von 1,7-Octadien mit verschiedenen erfindungsgemäßen Komplexverbindungen.

#### 4) Metathese acyclischer Olefine

[0054] Das Potential der erfindungsgemäßen Komplexverbindungen in der Metathese acyclischer Olefine wird durch die Homometathese von 1-Octen zu 7-Tetradecen unter Freisetzung von Ethylen veranschaulicht (Tab. 6)

Typischer Reaktionsansatz:

[0055] Eine Lösung von 6.0 µmol der jeweiligen Komplexverbindung in 1 ml 1,2-Dichlorethan wurde mit 3.0 mmol 1-Octen versetzt. Nach 3 h bei 45 °C wurde das Reaktionsgemisch GC/MS-analytisch untersucht.

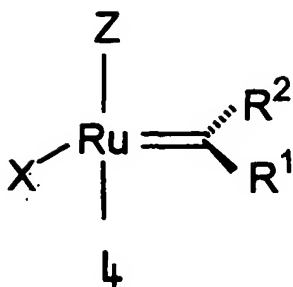
Katalysator	Monomer / Katalysator	Zeit [h]	Ausbeute [%]	E / Z
1	500	3	51	3.7
2	500	3	47	3.4
3	500	3	22	3.5

Tab. 6 Homometathese von 1-Octen mit verschiedenen erfindungsgemäßen Komplexverbindungen.

[0056] ROMP von 1,5-Cyclooctadien mit erfindungsgemäßen Komplexverbindungen:  $\diamond$  Komplexverbindung 3;  $\Delta$  Komplexverbindung 1; und  $o$  RuCl<sub>2</sub>(PCy<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(CHPh) (P. Schwab, M. B. France, J. W. Ziller, R. H. Grubbs, Angew. Chem., 1995, 107, 2179-2181; Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 1995, 34, 2039-2041)

#### Patentansprüche

1. Komplexverbindungen des Rutheniums der allgemeinen Strukturformel I



in der X ein anionischer Ligand ist,

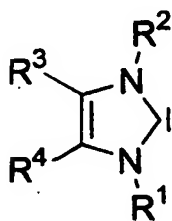
in der Z einen ein- bis dreizähligen Liganden darstellt, der ein Metall enthält und nicht-ionisch an das Rutheniumzentrum gebunden ist,

in der R<sup>1</sup> und R<sup>2</sup> gleich oder unabhängig voneinander verschieden sind, aber auch einen Cyclus ausbilden können, in der R<sup>1</sup> und R<sup>2</sup> für Wasserstoff oder/und für eine Kohlenwasserstoffgruppe stehen,

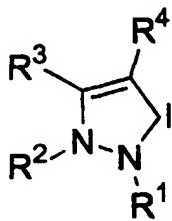
wobei die Kohlenwasserstoffgruppen gleich oder unabhängig voneinander verschieden aus einem geradkettigen oder verzweigten oder/und cyclischen Rest aus der Gruppe von Alkylresten mit 1 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkenylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Arylresten mit 6 bis 30 Kohlenstoffatomen und Silylresten bestehen,

wobei in den Kohlenwasserstoff- oder/und Silylgruppen die Wasserstoffatome teilweise oder gänzlich durch eine Alkyl-, Aryl-, Alkenyl-, Alkyl-, Metallocenyl-, Halogen-, Nitro-, Nitroso-, Hydroxy-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amino-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio- oder/und Sulfonylgruppe einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden ersetzt sein können,

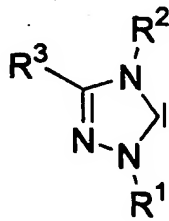
in der Ligand L ein N-heterocyclisches Carben der allgemeinen Formeln II - V ist,



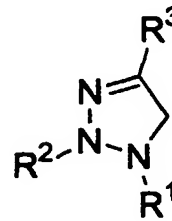
II



III



IV



V

wobei R<sup>1</sup>, R<sup>2</sup>, R<sup>3</sup> und R<sup>4</sup> in den Formeln II, III, IV und V gleich oder unabhängig voneinander verschieden für Wasserstoff oder/und für eine Kohlenwasserstoffgruppe stehen,

wobei die Kohlenwasserstoffgruppen gleich oder unabhängig verschieden voneinander aus cyclischen, geradkettigen oder/und verzweigten Resten aus der Gruppe von Alkylresten mit 1 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkenylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Arylresten mit 6 bis 30 Kohlenstoffatomen bestehen, bei denen gegebenenfalls mindestens ein Wasserstoff durch funktionelle Gruppen ersetzt sein kann, und wobei gegebenenfalls R<sup>3</sup> und R<sup>4</sup> für Halogen-, Nitro-, Nitroso-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio- oder/und Sulfonylgruppe einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden stehen kann.

2. Komplexverbindungen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der anionische Ligand X ausgewählt ist unter Halogenid, Pseudohalogenid, Tetraphenylborat, perhalogeniertes Tetraphenylborat, Tetrahalogenoborat, Hexahalogenophosphat, Hexahalogenoantimonat, Trihalogenmethansulfonat, Alkoxid, Thiolat, Carboxylat, Tetrahalogenoaluminat, Tetracarbonylcobaltat, Hexahalogenoferrat(III), Tetrahalogenoferrat(III) und Tetrahalogenopalladat(II).

3. Komplexverbindungen nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß Z einen ein- bis dreizähligen Ligan-

den  $L'_nMX'_m$  darstellt,

wobei  $n=0$  bis 4,  $m=0$  bis 6 und  $m+n \neq 0$  ist,

wobei  $L'$  gleich oder unabhängig verschieden voneinander aus der Gruppe der  $\pi$ -gebundenen, ungesättigten carbocyclischen Kohlenwasserstoffe oder / und der Gruppe der neutralen Elektronendonoren ist.

wobei  $X'$  gleich oder unabhängig verschieden voneinander für einen anionischen Liganden aus der Gruppe von Halogenid, Pseudohalogenid, Tetraphenylborat, perhalogeniertes Tetraphenylborat, Tetrahalogenoborat, Hexahalogendiphosphat, Hexahalogenoantimonat, Trihalogenmethansulfonat, Alkoxid, Thiolat, Carboxylat, Tetrahalogenoaluminat, Tetracarbonylcobaltat, Hexahalogenoferat(III), Tetrahalogenoferat(III) oder/und Tetrahalogenopalladat(II) steht,

und wobei  $M$  für ein Metall steht.

4. Komplexverbindungen nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß  $L'$  gleich oder unabhängig verschieden voneinander ausgewählt ist unter Cyclopentadienyl-, Pentamethylcyclopentadienyl- oder anders substituierten Cyclopentadienylrest, Benzol, substituierten Benzol, Phosphan, Phosphit, Amin, Imin, Nitril, N-heterocyclischen Carben und Carbonyl.

5. Komplexverbindungen nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß  $X'$  gleich oder unabhängig verschieden voneinander ausgewählt ist unter einem Halogenid, Pseudohalogenid, Alkoxid, Thiolat und Carboxylat.

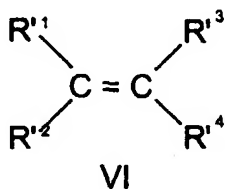
6. Komplexverbindungen nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß  $M$  ein Metall der 1. bis 8. Nebengruppe oder der 1. bis 4. Hauptgruppe ist.

7. Komplexverbindungen nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß  $M$  ausgewählt ist unter Osmium, Rhodium, Iridium, Ruthenium, Eisen, Palladium, Rhenium, Molybdän, Wolfram, Bor, Aluminium und Silicium.

8. Komplexverbindungen nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß in den allgemeinen Formeln II, III, IV und V der Wasserstoff in den Kohlenwasserstoffgruppen  $R^1$ ,  $R^2$ ,  $R^3$  und  $R^4$  teilweise oder gänzlich durch Halogen-, Nitro-, Nitroso-, Hydroxy-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amino-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio-, Sulfonyl- oder/und Metallocenylgruppen einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden ersetzt sind.

9. Komplexverbindungen nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß in den allgemeinen Formeln II, III, IV und V  $R^3$  und  $R^4$  ein anneliertes Ringsystem darstellen.

10. Verfahren zur Herstellung von acyclischen Olefinen mit zwei oder mehr Kohlenstoffatomen oder/und von cyclischen Olefinen mit drei oder mehr Kohlenstoffatomen jeweils entsprechend der allgemeinen Formel VI



aus acyclischen Olefinen mit zwei oder mehr Kohlenstoffatomen oder/und aus cyclischen Olefinen mit drei oder mehr Kohlenstoffatomen jeweils entsprechend der allgemeinen Formel VI durch Olefin-Metathese-Reaktion in Gegenwart mindestens eines Katalysators, dadurch gekennzeichnet, daß ein Katalysator nach einem der Ansprüche 1 bis 9 eingesetzt wird und daß  $R^1$ ,  $R^2$ ,  $R^3$  und  $R^4$  in der allgemeinen Formel VI für Wasserstoff oder/und Kohlenwasserstoffgruppen stehen,

wobei die Kohlenwasserstoffgruppe gleich oder unabhängig voneinander verschieden aus geradkettigen, verzweigten oder/und cyclischen Resten aus der Gruppe von Alkylresten mit 1 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkenylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Alkynylresten mit 2 bis 50 Kohlenstoffatomen, Arylresten mit 6 bis 30 Kohlenstoffatomen, Metallocenyl- oder/und Silylresten besteht, bei denen gegebenenfalls mindestens ein Wasserstoff für eine funktionelle Gruppe stehen kann,

wobei gegebenenfalls  $R^1$ ,  $R^2$ ,  $R^3$  und  $R^4$  für Halogen-, Nitro-, Nitroso-, Hydroxy-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amino-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio-, Sulfonyl- oder/und Metallocenylgruppen einfach oder mehrfach, gleich oder



unabhängig voneinander verschieden stehen.

11. Verfahren gemäß Anspruch 10 dadurch gekennzeichnet, daß in den eingesetzten oder/und herzustellenden Olefinen eine oder mehrere Doppelbindungen enthalten sind.

12. Verfahren gemäß Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß  $R^1$ ,  $R^2$ ,  $R^3$  und  $R^4$  in den Olefinen der allgemeinen Formel VI paarweise, gleich oder unabhängig voneinander verschieden, einen Cyclus ausbilden.

13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß in den Olefinen der allgemeinen Formel VI der Wasserstoff in den Kohlenwasserstoffgruppen  $R^1$ ,  $R^2$ ,  $R^3$  und  $R^4$  teilweise oder gänzlich durch Halogen-, Silyl-, Nitro-, Nitroso-, Hydroxy-, Alkoxy-, Aryloxy-, Amino-, Amido-, Carboxyl-, Carbonyl-, Thio-, Sulfonyl- oder/und Metallocenylgruppen einfach oder mehrfach, gleich oder unabhängig voneinander verschieden ersetzt sein können.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Prozeß in Lösungsmittel durchgeführt wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Prozeß in organischen Lösungsmitteln durchgeführt wird.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren unter Zusatz einer Brönstedt-Säure durchgeführt wird.

17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Brönstedt-Säure ausgewählt ist unter HCl, HBr, HI,  $\text{HBF}_4$ ,  $\text{HPF}_6$  und Trifluoressigsäure.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren unter Zusatz einer Lewis-Säure durchgeführt wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Lewis-Säure ausgewählt ist unter  $\text{BF}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$  oder/und  $\text{CuCl}_2$ .

20. Verwendung einer Komplexverbindung nach einem der Ansprüche 1 bis 9 in der Olefin-Metathese.

Abbildung 1

